

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

(11) N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 604 448

(21) N° d'enregistrement national :

87 12954

(51) Int Cl⁴ : C 23 C 10/30; F 02 C 7/00.

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 18 septembre 1987.

(30) Priorité : US, 25 septembre 1986, n° 911, 681.

(43) Date de la mise à disposition du public de la
demande : BOPI « Brevets » n° 13 du 1^{er} avril 1988.

(66) Références à d'autres documents nationaux appa-
rentés :

(71) Demandeur(s) : UNITED TECHNOLOGIES CORPORA-
TION. — US.

(72) Inventeur(s) : Peter Jon Draghi; John Peter Arrigoni.

(73) Titulaire(s) :

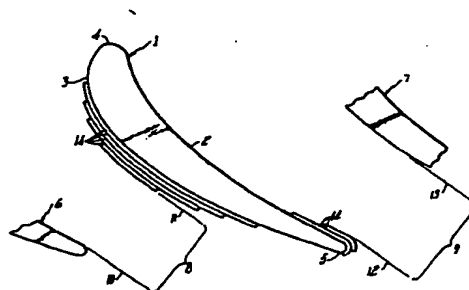
(74) Mandataire(s) : Cabinet Michel Bruder.

(54) Reclassification des zones de distribution définies entre des aubes fixes d'une turbine.

(57) L'invention concerne la reclassification des zones de dis-
tribution définies entre des aubes fixes d'une turbine.

Lorsqu'une aube fixe 1 d'une turbine à gaz a subi des
déformations et une usure, l'écartement entre des aubes fixes
successives 6, 7 définissant des zones de distribution 8, 9 du
flux de gaz, augmente. On recharge la zone d'usure en appli-
quant, sur l'aube, des couches d'un ruban 12 d'une épaisseur
uniforme. Ce ruban comprend un mélange d'un agent liant et
d'une poudre d'alliage, qui est compatible avec l'alliage du
substrat.

L'invention est utilisée pour réduire les coûts de remise en
état des aubes fixes usées des turbines en évitant tout pro-
cédé de cintrage ou de formage à chaud.



FR 2 604 448 - A1

Procédé de Reclassification des zones de distribution définies
entre des aubes fixes d'une turbine.

5 La présente invention concerne des éléments d'une turbine à gaz et, plus particulièrement, une méthode de reclassification de la zone de distribution définie entre des aubes fixes adjacentes d'une turbine.

10 Une turbine à gaz comprend une section de compresseur, une section de combustion et une section de turbine. A l'intérieur de la section de turbine, sont disposées des rangées alternées d'aubes rotatives et d'aubes fixes. A mesure que les gaz de combustion chauds passent à travers la section de turbine, les aubes mobiles sont entraînées en rotation, faisant ainsi tourner un arbre qui engendre une force motrice pour
15 entraîner la section de compresseur et d'autres systèmes auxiliaires. Plus la température des gaz est élevée, plus la force motrice pouvant être extraite dans la section de turbine est importante et plus l'efficacité globale est grande.
20 Afin d'accroître la capacité thermique dans les conditions de fonctionnement de la section de turbine, on utilise des matières constituées de superalliages à base de cobalt et de nickel pour réaliser les aubes mobiles et les aubes
25 fixes à surface portante des turbines. Ces matières maintiennent la résistance mécanique à des températures élevées.

Les aubes fixes disposées entre les rangées d'aubes mobiles rotatives stabilisent et dirigent le flux de gaz d'une rangée d'aubes mobiles rotatives d'une turbine vers la rangée suivante, une zone de distribution étant définie par l'écartement entre les aubes fixes adjacentes. Cette stabilisation du flux de gaz optimise l'importance de la force motrice extraite dans la section de turbine. En règle générale, aux zones de distribution de flux de gaz, on attribue des numéros de classification qui sont en corrélation avec le flux de gaz volumétrique, permettant ainsi d'établir des comparaisons relatives aux propriétés définissant les flux de gaz entre des aubes fixes à géométrie complexe. En conséquence, pour des raisons de commodité, la zone de distribution est définie en termes d'une dimension faisant partie d'une classe. Par exemple, dans une turbine à gaz d'un modèle particulier, une zone de distribution de la classe 27 a une surface ouverte de $12,051-12,219 \text{ cm}^2$ ($1,868-1,894$ pouce carré), tandis qu'une zone de distribution de la classe 29 a une surface ouverte de $12,38-12,541 \text{ cm}^2$ ($1,919-1,944$ pouce carré), quelle que soit la géométrie.

Lors de la mise en service, la surface des aubes fixes se détériore par suite de l'oxydation et de l'érosion des métaux résultant des matières abrasives et corrosives présentes dans le flux du courant de gaz venant heurter les aubes fixes. En outre, les hautes sollicitations résultant des gaz à des températures élevées favorisent la déformation des aubes fixes, agrandissant ainsi la zone de distribution avec, pour conséquence, une perte du rendement de la

turbine. Au cours d'une remise en état périodique d'une turbine, on inspecte les aubes fixes concernant leur détérioration physique et on les évalue pour déterminer le degré de changement qu'a subi la zone d'écoulement et l'effet produit sur la classification de la zone de distribution. Avant que ces aubes fixes puissent être réinstallées dans la turbine, toute matière ayant subi une érosion doit être remplacée et, par ailleurs, les aubes fixes doivent être reclassifiées. En outre, les aubes fixes qui ont éventuellement subi une perte de métal ou un changement de forme suite à un enlèvement de leur revêtement ou aux réparations, doivent être reclassifiées.

Il existe plusieurs méthodes en vue de modifier une aube fixe pour ramener la zone de distribution du flux de gaz à sa classification initiale (reclassification). Une méthode consiste à frapper à chaud ou à cintrer d'une autre manière le bord de fuite de l'aube fixe, rétrécissant ainsi l'espace libre entre des aubes fixes adjacentes. Toutefois, ce cintrage donne lieu à des contraintes qui peuvent provoquer des crevasses dans l'aube fixe. Ce cintrage peut également provoquer une déformation excessive de l'aube fixe, empêchant ainsi d'ajuster et d'étancher correctement les tubes de refroidissement internes, tandis que les dispositifs de fixation qui maintiennent les aubes fixes au cours du cintrage, peuvent déformer le pied des aubes ou écraser leur base. Même si les contraintes résultant du cintrage peuvent être réduites, plusieurs alliages prévus pour des températures élevées et utilisés dans des turbines à gaz ne peuvent être façonnés ou cintrés à chaud en raison des effets néfastes

exercés sur des propriétés matérielles telles que la résistance à la fatigue. Etant donné que le processus de cintrage ne recharge pas du métal sur la surface de l'aube, aucune contribution n'est apportée en ce qui concerne la résistance et, du point de vue structural, l'aube est moins résistante que le serait une nouvelle, limitant ainsi la durée de vie utile de cette aube.

Une autre méthode en vue de reclassifier des aubes fixes de turbines consiste à ajouter un alliage à la surface détériorée d'une aube, moyennant un procédé combiné de soudure/pulvérisation au plasma tel que celui décrit dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 4.028.787 aux noms de Cretella et al. Ce procédé nécessite l'addition de cordons de soudure sur la surface usée en vue de la renforcer, puis l'addition d'un certain nombre de couches de l'alliage pulvérisées au plasma, afin d'obtenir l'épaisseur d'alliage voulue. Ce procédé exige énormément de travail, car un soudeur doit ajouter un certain nombre de cordons de soudure sur une petite surface, puis nettoyer l'aube et ensuite, ajouter un certain nombre de couches de pulvérisation au plasma. En outre, l'aube peut être endommagée en raison des contraintes thermiques qu'implique l'opération de soudage.

Un autre problème que pose le procédé de soudure/pulvérisation au plasma, réside dans la surface spécifique de détérioration. On doit s'attendre à ce que la détérioration soit plus grave à la dimension la plus étroite de la zone de distribution où la vitesse du flux de gaz est à son maximum. Au cours du procédé de pul-

5 vérification au plasma, on ajoute, à la surface,
un alliage en couches très minces, définissant
ainsi une large configuration uniforme. Au terme
de la pulvérisation au plasma, la matière excé-
5 dendaire doit être éliminée des zones non érodées
de l'aube. Si la détérioration est grave dans
une zone spécifique, de nombreuses couches de
l'alliage doivent être ajoutées et bon nombre
d'entre elles doivent être éliminées des zones
10 non érodées. Ce procédé est de longue haleine
et il donne lieu à des pertes dans les matières
d'alliage en cause. En conséquence, il s'est
avéré nécessaire de trouver une méthode en vue
de reclassifier des aubes fixes de turbines,
15 cette méthode impliquant l'addition d'un alliage
à une surface spécifique, tout en réduisant les
dépenses consenties au minimum.

Un objet de la présente invention est
de fournir une méthode simplifiée en vue d'ajouter
20 une quantité réglée d'un alliage sur une surface
spécifique d'un article.

Un autre objet de la présente invention
est de fournir une méthode en vue de reclassifier
des aubes fixes de turbines, cette méthode permet-
25 tant de réduire l'importance du travail devant
être exécuté pour recharger un alliage à un
endroit spécifique sur la surface d'une aube
fixe de turbine.

Un autre objet de la présente invention
30 est de fournir une méthode en vue de reclassifier
des aubes fixes de turbines, qui ne peuvent être
façonnées ou cintrées à chaud.

On réalise ces différents objets de
la présente invention, ainsi que d'autres, en
35 appliquant une ou plusieurs couches d'une matière

en ruban sur la surface spécifique d'un article jusqu'à ce qu'on obtienne une épaisseur désirée, cette matière en ruban comprenant un mélange d'un agent liant et d'une poudre d'alliage, ce
5 mélange étant compatible avec le substrat, tandis qu'il est transformé en un ruban flexible d'une épaisseur uniforme et pourvu d'un support adhésif. Après application du ruban, on chauffe l'article à une température à laquelle l'adhésif et l'agent
10 liant se décomposent et à laquelle il se produit également une diffusion entre la poudre d'alliage contenue dans le ruban et l'alliage du substrat. En utilisant des couches de ruban d'une épaisseur constante, on peut réaliser une reclassification
15 précise de la zone de distribution des gaz dans une surface spécifique avant le chauffage et sans devoir procéder à des opérations laborieuses de soudage ou de pulvérisation au plasma, la reclassification pouvant être effectuée conjointement avec la réparation des parties superficielles crevassées. Une étape finale d'usinage
20 unira les bords du ruban, donnant ainsi une surface profilée lisse.

L'unique dessin annexé illustre le
25 procédé de reclassification des aubes fixes selon la présente invention.

Ce dessin illustre la méthode de reclassification de la présente invention. Une aube fixe 1 comporte une surface concave 2, une
30 surface convexe 3, un bord d'attaque 4 et un bord de fuite 5. Cette aube 1 est disposée entre une aube fixe d'amont 6 et une aube fixe d'aval 7, une zone de distribution 8 étant définie entre

les aubes fixes 6 et 1, tandis qu'une zone de distribution 9 est définie entre les aubes fixes 1 et 7, les zones de distribution mesurées à l'écartement le plus étroit entre deux aubes fixes adjacentes étant illustrées par les lignes 10, 11, 12 et 13.

A titre d'illustration, on supposera que, pour les aubes fixes 1, 6 et 7, on utilise des aubes fixes qui ont été inspectées et chez lesquelles on a constaté qu'il s'imposait de reclassifier la zone de distribution pour obtenir un rendement optimum de la turbine. A titre d'illustration encore, les aubes fixes 1, 6 et 7 sont réalisées en un superalliage à base de cobalt ayant la composition nominale suivante : 23,4Cr, 10Ni, 7W, 3,5Ta, 0,2Ti, 0,6C, 0,5Zr et 1,5Fe. Des aubes fixes constituées d'une telle matière ne peuvent être frappées ou cintrées à chaud sans modifier de manière préjudiciable les propriétés de résistance à la fatigue de l'alliage. En conséquence, ces aubes fixes doivent être remplacées ou on doit les recharger d'un substrat d'alliage aux endroits détériorés. Bien qu'un tel alliage soit indiqué pour illustrer la présente invention, l'homme de métier comprendra que la méthode de la présente invention pourrait être bénéfique pour des articles constitués d'autres matières telles que des superalliages à base de fer ou de nickel.

En conséquence, on effectue la reclassification en ajoutant des couches successives d'une matière en ruban 14 sur la surface détériorée de l'aube fixe 1. Le ruban utilisé comprend un mélange d'une poudre d'alliage et d'un agent liant, ce mélange étant transformé en une pâte

et étalé pour former une feuille d'une épaisseur uniforme. La matière en ruban peut être obtenue en adoptant les enseignements du brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 3.293.072, mentionné
5 ici à titre de référence. Ce brevet indique la façon dont on peut obtenir un ruban en utilisant une pellicule support amovible comme substrat et en employant un polymère organique tel que l'alcool polyvinylique ou des polyméthacrylates,
10 conjointement avec une plus faible quantité d'un plastifiant volatil tel que l'acéto-isobutyrate de sucrose, le phtalate de dibutyle ou l'oxalate de diéthyle, lorsqu'il s'agit d'une utilisation avec les agents liants à base de polyméthacrylate,
15 et la glycérine lorsqu'il s'agit d'une utilisation avec les agents liants à base d'alcool polyvinylique. La matière en poudre est transformée en une bouillie avec l'agent liant, le plastifiant et l'acétone, comme solvant, cette bouillie étant
20 appliquée en une couche mince sur un support amovible, puis chauffée pour éliminer le solvant. La feuille de matière obtenue est ensuite découpée en bandes flexibles auxquelles on ajoute un support adhésif.

25 La poudre d'alliage constitue le composant principal du ruban et elle est compatible avec le substrat, tandis qu'elle peut résister aux conditions du milieu ambiant de mise en service ; elle comprend habituellement un alliage
30 compatible pouvant être lié par brasage ou par diffusion. Lorsqu'il s'agit d'utiliser le super-alliage à base de cobalt décrit précédemment, la poudre d'alliage comprend un mélange de 60% en poids d'un alliage dont la composition nominale
35 est de 24,5Cr, 40Ni, 3B, le reste étant du cobalt,

ainsi que de 40% en poids de l'alliage du substrat sous forme d'une poudre.

En se référant au dessin annexé, le ruban 14 pourvu d'un support adhésif est ajouté en couches jusqu'à ce qu'on obtienne la quantité
5 désirée d'alliage. Etant donné que ce ruban est mince et flexible, il est aisé de l'adapter spécialement à la forme et à l'épaisseur désirées, en ayant la possibilité d'épouser le contour
10 de surfaces irrégulières. Les couches sont déposées en pyramide pour former une élévation progressive dans l'épaisseur de l'alliage dans une surface spécifique de l'aube fixe, rétrécissant ainsi l'espace compris entre les aubes fixes.

15 Entre les aubes fixes 6 et 1, on représente quatre couches de ruban tandis que, entre les aubes fixes 1 et 7, on observe deux couches. L'homme de métier comprendra que le ruban peut être appliqué sur l'une ou l'autre ou les deux
20 faces de l'aube fixe, en fonction des circonstances particulières en cause.

L'aube fixe 1 sur laquelle a été appliqué le ruban 14, est ensuite chauffée à une température à laquelle il se produit une liaison.
25 A cette température ou à une température inférieure, l'agent liant et le support adhésif se décomposent sans laisser d'importants résidus, évitant ainsi de contaminer l'alliage. La poudre d'alliage que renferme le ruban, se lie ensuite à l'alliage
30 du substrat, formant ainsi une microstructure continue exempte d'espaces vides. Dans une forme de réalisation préférée, cette liaison implique une liaison transitoire en phase liquide comme décrit dans les brevets des Etats-Unis d'Amérique
35 n° 3.678.570, 4.005.988 t 4.073.639 mentionnés

ici à titre de référence, établissant ainsi une liaison à une température à laquelle l'alliage de base peut être exposé sans qu'aucun effet néfaste ne se manifeste. Au cours de la liaison transitoire en phase liquide, l'article est
5 maintenu à la température de liaison jusqu'à l'obtention de la solidification isotherme. Pour obtenir une liaison transitoire en phase liquide, l'alliage du ruban contient le même
10 métal de base que l'aube fixe en superalliage et il a une haute teneur en bore. La présence de bore, soit, de préférence, 1-5% en poids, fait office d'agent abaissant le point de fusion, amenant ainsi la température du point de fusion
15 en dessous de celle du superalliage, ainsi qu'en dessous de celle qui provoquerait des changements métallurgiques néfastes et irréversibles dans l'alliage du substrat. Après la liaison, l'aube fixe est soumise à un traitement thermique pour
20 assurer l'homogénéisation de la microstructure entre l'alliage du ruban et l'alliage du substrat.

Après avoir lié le ruban à l'aube fixe, on usine la surface pour obtenir le profil superficiel correct. Pour cette opération, il est
25 généralement nécessaire d'unir les bords du ruban afin d'obtenir une surface aérodynamique lisse.

EXEMPLE

On a démonté une aube fixe de turbine, constituée d'un superalliage à base de cobalt et ayant la composition nominale suivante :
30 23,4Cr, 10Ni, 7W, 3,5Ta, 0,2Ti, 0,6C, 0,5Zr et 1,5Fe, et on l'a examinée après un certain nombre d'heures de mise en service dans une turbine à gaz. Cette aube a été nettoyée par grenaillage
35 et on a éliminé chimiquement un revêtement

d'aluminium de ses surfaces. On a ensuite examiné l'aube avec une matière pénétrante fluorescente telle que "Zyglo" (marque commerciale déposée), afin de localiser les crevasses ou d'autres défauts superficiels. Après avoir déterminé que l'on pouvait remédier aux défauts, on a mesuré la zone de distribution (classe) et on l'a enregistrée. Il a été déterminé que la zone de distribution s'était agrandie et qu'un apport de matière était nécessaire pour ramener l'aube à sa classe initiale.

L'aube fixe en alliage de cobalt a été nettoyée dans une cornue à hydrogène à une température de 1.149°C (2.100°F) pendant deux heures et demie, puis elle a été nettoyée sous vide à 1.149°C (2.100°F) pendant 2 heures.

Sur l'aube, on a ensuite appliqué une matière en ruban ayant une épaisseur uniforme de 0,508 mm (0,020 pouce) et contenant une poudre d'alliage qui était compatible avec l'alliage du substrat et un agent liant, le mélange formulé pour assurer une liaison transitoire en phase liquide étant constitué d'un mélange de 60% en poids d'un alliage ayant la composition nominale suivante : 24,5Cr, 40Ni, 3B, le reste étant du cobalt, ainsi que de 40% en poids de l'alliage du substrat sous forme d'une poudre. On a découpé quatre couches du ruban à la forme appropriée et, au moyen d'un adhésif, on les a appliquées sur une face de l'aube, tandis que l'on a appliqué deux couches sur le bord de fuite. On a fait varier la largeur de chaque couche afin de favoriser une recharge régulière de la matière sur la surface de l'aube. On a ensuite chauffé cette dernière à une température de

1.149°C (2.100°F) sous vide et on l'a maintenue à cette température pendant 12 heures. A cette température, l'agent liant et le support adhésif se décomposent en ne laissant essentiellement
5 aucun résidu, tandis que la poudre d'alliage fondue vient se fusionner à et se diffuse dans l'alliage du substrat, définissant ainsi une surface épaissie unitaire, la matière en ruban venant en même temps combler les crevasses
10 éventuelles présentes dans la zone faisant l'objet de la reclassification. La solidification a lieu de manière isotherme à mesure que l'agent à base de bore abaissant le point de fusion se diffuse dans l'alliage du substrat.

15 Ensuite, on unit la recharge de matière en utilisant une meule à bande abrasive qui rogne les bords du ruban en diminuant pour obtenir une surface lisse et continue. Ensuite, on soumet l'aube à un grenailage, on la soumet à un examen
20 au moyen de particules fluorescentes et l'on mesure la zone de distribution pour confirmer la reclassification correcte. On ouvre à nouveau les trous d'air éventuellement obstrués dans l'aube et l'on applique à nouveau un revêtement
25 sur celle-ci.

L'aube revêtue est soumise à un examen final et l'on contrôle à nouveau sa classification. Il est à noter que le revêtement a généralement pour conséquence d'amener l'aube dans une classi-
30 fication inférieure par suite de la plus forte épaisseur de la matière de revêtement déposée sur la surface définissant la zone de distribution. Ce facteur doit être pris en considération lorsqu'il s'agit de déterminer les couches de ruban
35 qui doivent être appliquées.

En adoptant un procédé de reclassifi-
cation faisant appel à un ruban, on supprime
les opérations très laborieuses de soudage et
les contraintes thermiques qui en résultent.
5 Ce procédé permet également de recharger de
manière réglée à une valeur précise imposée et
d'obtenir une configuration homogène de l'alliage
du substrat. Bien que l'on ait décrit la forme
de réalisation préférée de la présente invention
10 en se référant à une aube fixe de turbine, l'hom-
me de métier comprendra que la présente invention
peut être bénéfique à n'importe quel élément
d'une turbine, nécessitant un apport réglé d'un
alliage de substrat sur une surface spécifique.
15 Bien que la description ait été donnée en se
référant à un superalliage à base de cobalt,
à une température de 1.149°C (2.100°F) et à un
temps de 12 heures, l'homme de métier comprendra
que d'autres modifications, en termes de temps,
20 de température, d'alliage, d'épaisseur ou de
largeur de ruban, peuvent être envisagées sans
se départir du cadre de la présente invention.

REVENDECATIONS

1. Procédé en vue de recharger une surface spécifique d'un article en métal au moyen d'une quantité réglée d'un alliage, **caractérisé**
5 **en ce qu'il comprend les étapes qui consistent à :**

appliquer une ou plusieurs couches d'une matière en ruban sur la surface spécifique et jusqu'à l'obtention d'une épaisseur désirée,
10 ce ruban comprenant un mélange d'un agent liant et d'une poudre d'alliage, ce mélange étant compatible avec l'alliage du substrat, après quoi il est transformé en un ruban d'une épaisseur uniforme comportant un support adhésif ; et
15 chauffer l'article à une température à laquelle l'adhésif et l'agent liant se décomposent, et à laquelle également il se produit une liaison entre l'alliage en poudre contenu dans le ruban, et l'alliage du substrat.

20 2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que l'article et le ruban sont chauffés sous vide.**

3. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que la liaison consiste en**
25 **une liaison par diffusion.**

4. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que le ruban pourvu de ses couches est uni pour obtenir une surface profilée lisse.**

30 5. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que la liaison précitée est une liaison transitoire en phase liquide, l'alliage du ruban comprenant entre 1 et 5% en poids de bore.**

35 6. Procédé selon la revendication 5,

caractérisé en ce qu'il comprend les étapes supplémentaires consistant à :

maintenir l'article à la température de liaison jusqu'à ce que la solidification isotherme ait lieu ; et

soumettre l'article à un traitement thermique pour assurer l'homogénéisation de l'alliage du ruban et de l'alliage du substrat.

7. Procédé de reclassification de la zone de distribution comprise entre des aubes fixes adjacentes de turbines, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes qui consistent à :

déterminer l'excès d'écartement entre les aubes fixes dans la zone de distribution, appliquer, jusqu'à l'obtention d'une épaisseur désirée, une ou plusieurs couches d'une matière en ruban sur la surface défectueuse, ce ruban comprenant un mélange d'un agent liant et d'une poudre d'alliage, qui est semblable à l'alliage du substrat, ce mélange étant ensuite transformé en un ruban d'une épaisseur uniforme comprenant un support adhésif ;

chauffer l'aube fixe à une température à laquelle l'adhésif et l'agent liant se décomposent et à laquelle également il se produit une liaison entre la poudre d'alliage contenue dans le ruban et l'alliage du substrat ; et

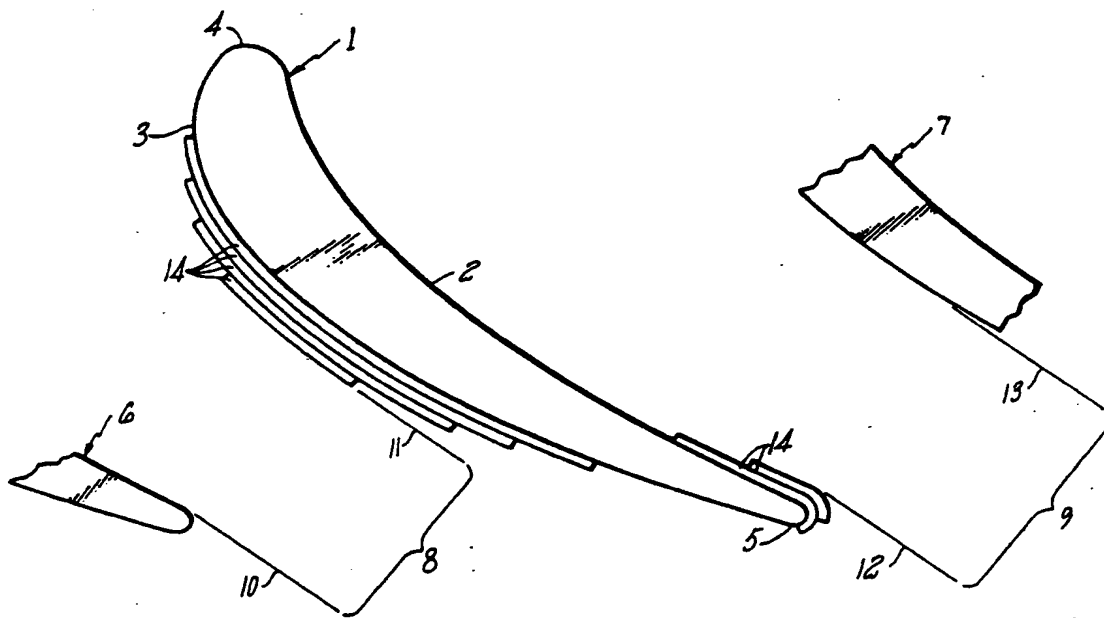
unir la matière d'alliage ajoutée pour obtenir une surface essentiellement lisse.

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'on chauffe l'aube fixe et le ruban sous vide.

9. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que cette liaison consiste en une liaison par diffusion.

2604448

Planche unique



10. Procédé selon la revendication 7,
caractérisé en ce que cette liaison consiste
en une liaison transitoire en phase liquide,
l'alliage du ruban comprenant entre 1 et 5% en
5 poids de bore.

11. Procédé selon la revendication 10,
caractérisé en ce qu'il comprend les étapes sup-
plémentaires consistant à :

maintenir l'aube fixe à la température
10 de liaison jusqu'à ce qu'il se produise une
solidification isotherme ; et

soumettre l'aube à un traitement ther-
mique afin d'assurer l'homogénéisation de l'al-
liage du ruban et de l'alliage du substrat.